

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响
..... 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素
..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星、性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险
..... 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析

范新风^{1,2,3}, 韩美^{2*}, 王磊^{1,3,4}, 李秀萍¹, 周璟¹

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 2. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘要: 根据 2008 ~ 2017 年小清河入海口水体污染物浓度监测数据, 选取 13 个污染因子, 利用污染指数评价法、相关系数分析法以及主成分分析法等对入海径流水质变化进行了分析, 并研究影响水质变化的驱动因素。结果表明, 2008 ~ 2017 年, 小清河入海口水质呈好转状态, 污染状况大大减轻; 不同污染因子超标情况有所差异, 化学需氧量、石油类污染物超标情况最严重, 磷类污染物次之, 其他污染物基本符合 III 类水质标准; 石油类、化学需氧量、氨氮、亚硝酸盐氮和砷等污染物的污染程度整体呈下降趋势, 磷、硝酸盐氮以及重金属中的铜、镉、铅、锌、汞和六价铬等污染物的污染程度呈不同程度上升趋势; 污染物排放以及土地利用类型的变化是小清河水质整体上较差的主要因素, 污水处理率的提高以及水环境保护政策的实施是小清河水质明显改善的重要原因, 温度、日照时长、降水和瞬时径流等气候和水文因素也间接影响小清河入海径流的水质。

关键词: 小清河; 水质变化; 污染指数; 污染物排放; 土地利用类型变化; 污水处理

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1619-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201909074

Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years

FAN Xin-feng^{1,2,3}, HAN Mei^{2*}, WANG Lei^{1,3,4}, LI Xiu-ping¹, ZHOU Jing¹

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Chinese Academy of Sciences Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: According to the monitoring data of pollutant concentration in the Xiaoqing River estuary from 2008 to 2017, 13 pollutants affecting water quality were selected. The trends of changes in water quality were identified mainly by the pollution index method, and the driving factors affecting water quality changes were quantitatively and qualitatively analyzed by the Spearman and Pearson correlation analysis method and the principal component analysis. The results showed that the water quality of the Xiaoqing River estuary was improved and the pollution was greatly reduced from 2008 to 2017. The pollution factors were still above the limits to varying degrees; COD and petroleum were the most serious pollutants, TP came second, and the remaining pollutants basically met the water quality standards of the III. The pollution degree of petroleum, COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, and As showed an overall downward trend, and the pollution degree of TP, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, and Cr^{6+} showed an upward trend to different degrees. Social and economic factors were the main driving factors affecting the water quality of the Xiaoqing River. The discharge of pollutants and the changes in land use type led to serious water pollution overall in the Xiaoqing River, whereas the improvement of sewage treatment rate and the implementation of water environmental protection policy were the main factors affecting the water quality improvement of the Xiaoqing River. Natural factors were the secondary driving factors affecting the water quality of the Xiaoqing River. Climate and hydrological factors, such as temperature, sunshine duration, precipitation, and instantaneous runoff, also indirectly affected the water quality to different degrees.

Key words: Xiaoqing River; changes in water quality; pollution index; pollutant emission; change of land use type; sewage treatment

河流水质状况对流域人类活动、社会经济可持续发展以及水资源开发利用等起着至关重要的作用, 其中, 入海河流的水质状况以及输送的污染物通量是影响近岸海域生态环境最重要的因素之一。随着沿海地区经济的快速发展, 许多河流及其河口、海湾地区水环境质量持续下降, 入海河流作为海洋污染最重要的陆域污染源正受到广泛关注。国内外学者利用污染指数评价法、Spearman 相关系数法和内梅罗指数评价法等对我国长江、黄河以及淮河等水系河流水质状况进行了深入研究^[1~5], 河流水质评价体系日臻完善。小清河属于黄河流域渤海水系, 近

年来, 小清河流域以及入海口地区的水质评价研究比较丰富^[6,7], 但是主要针对营养盐^[8~10]和重金属^[11]等某一类污染物进行评价, 对于小清河入海口长时间序列整体水质变化情况研究较少, 而且对于小清河入海口水质变化驱动因素的研究也较少, 主要集中在定性分析人类活动对水环境的影响。水质

收稿日期: 2019-09-08; 修订日期: 2019-11-01

基金项目: 山东省社会科学规划研究项目(18BJJ05); 中国科学院大学生创新实践训练计划项目

作者简介: 范新风(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文学资源, E-mail: 1564392874@qq.com

* 通信作者, E-mail: hanmei568568@126.com

变化是一个非常复杂的过程,在水体内部与水体之间具有高度的时空变异性,并受多种相互作用的气候、水文等自然因素和人为因素的影响^[12].近年来,在莱州湾地区环境质量评估中,小清河入海口附近海域连续多年被定为严重污染等级.因此,研究小清河入海口水质变化及其驱动因素,以期相关部门制定针对小清河的治理措施、改善小清河流域以及莱州湾地区生态环境提供参考数据和依据.

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

小清河,发源于山东省济南市泉群,属于渤海水系河流,于潍坊寿光注入莱州湾.小清河全长 237 km,流域面积 10 336 km²,占全省面积的 10% 左右.小清河流域地形以平原为主,山地丘陵主要分布在流域南部,整体地形为南高北低,支流大部分自南向北流入干流.流域内年平均气温在 12 ~ 14℃,多年平均降水量为 640 mm 左右,主要集中在 6 ~ 9 月,属于暖温带大陆性季风气候区,土壤以褐土和潮土为主^[13,14].

历史上,小清河是山东省重要通航河道,兼顾渔业生产、农田灌溉等重要职能,而且水质清澈,水生生态系统良好,但是,随着流域内经济的繁荣发展和城市化进程的加快,小清河干支流接纳了来自工业生产等点状污染源以及农业生产等面状污染源的众多污染物排放,逐渐成为一条“排污河”,不仅影响流域内农田灌溉、工业生产、渔业养殖等经济生产活动,而且对莱州湾及其周围地区的可持续发展造成不利影响^[15,16].近年来,政府、社会等对小清河水质的关注度逐渐提高,提升小清河水环境质量成为推动该流域以及莱州湾沿岸地区经济、社会和生态发展的重要环节,小清河水质得到极大改善,主要污染物浓度显著下降,但是,小清河流域目前仍是山东省污染最重的地区之一.

1.2 数据来源及预处理

小清河入海口各污染物浓度值来自东经 118.827 5°、北纬 37.275° 的监测点在 2008 ~ 2017 年的水质监测数据,水质监测点位置如图 1 所示,监测时段为每年的 5、8 和 10 月,监测项目包括石油类污染物、化学需氧量(COD)、无机氮类污染物、砷(As)以及重金属类污染物,无机氮类污染物包括氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)以及亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N),重金属类污染物包括铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)以及六价铬(Cr⁶⁺).小清河入海口瞬时径流数据也是在水质监测点所在监测位置获得.城市废水排放量、城市废水处理率、农用

地和建设用地面积等数据以及温度、日照时长和降水等数据均来源于山东省统计年鉴.

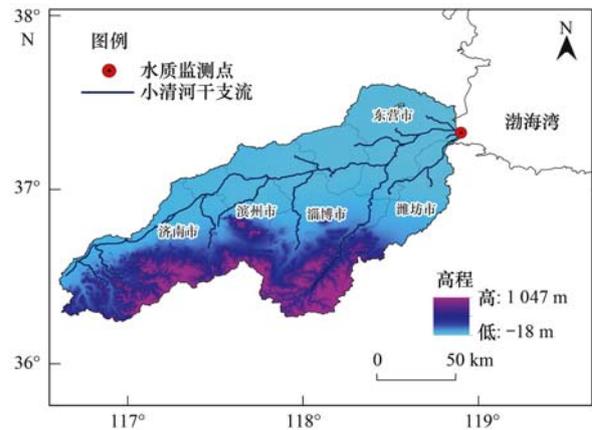


图 1 小清河流域水质监测点示意

Fig. 1 Map indicating the monitoring points in Xiaoqing River

1.3 研究方法

1.3.1 污染指数评价法

污染指数评价法是国内外评价河流污染水平时比较常见的一种方法,评价指标涉及各类有机污染物、无机污染物,比如氮、磷以及化学需氧量等.本文选用该方法来分析 2008 ~ 2017 年间小清河入海径流水质的变化特征.

污染指数包括污染因子的污染指数、平均污染指数和综合污染指数等^[17,18].

污染因子的污染指数:

$$P_i = c_i / S_i$$

式中, i 为污染因子, c_i 为污染因子 i 的实测含量, S_i 为污染因子 i 的评价标准值,参照地面水环境质量标准(GB 3838-88)^[19] 确定.

综合污染指数定义为:

$$K = \sum_{i=1}^n P_i$$

式中, K 为综合污染指数, n 为参与评价的污染因子个数.

平均污染指数定义为:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{K}{n}$$

式中, P 为平均污染指数, n 为参与评价的污染因子个数.

1.3.2 相关系数分析法

Pearson 相关系数是描述两个随机变量要素线性相关程度的统计量,本文中用来研究重金属污染因子之间的相关性;当两个变量要素之间线性相关程度较低时,可以使用 Spearman 相关系数分析法,本文用来研究污染因子与时间序列、自然因素影响指标之间的相关程度^[20].

相关系数的符号表示两个变量要素之间的关联方向,绝对值表示两要素之间的相关程度,介于 $[-1,1]$ 区间^[21].设两个变量要素 x 和 y ,如果 y 在 x 增加时增加,则两者呈正相关关系,相关系数为正;如果 y 在 x 增加时减小,则两者呈负相关关系,相关系数为负.相关系数的绝对值越接近于1,表示两要素之间的相关程度越大;越接近于0,表示两要素的之间的相关程度越小.当两变量的相关系数绝对值在0.8~1.0之间,说明两者呈极强相关关系;在0.6~0.8之间,呈强相关关系;在0.4~0.6之间,呈中度相关关系;在0.2~0.4之间,呈弱相关关系;小于0.2,则说明两变量呈极弱相关关系或者无相关关系.

1.3.3 主成分分析法

主成分分析法是一种利用“降维”的思想,把多种变量要素转化为少数几个综合变量要素(即主成分)的多元统计方法,每个主成分可以反映原始变量的大部分信息,而且各主成分之间所含原始信息互不重复^[22].本文使用主成分分析法研究重金属污染因子的来源.

2 结果与分析

2.1 小清河入海口水质变化趋势

本文所选水质监测位置位于小清河流域寿光市侯辛庄村北至入渤海莱州湾口的河道水域,该水域水质标准类别属于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)Ⅲ类水质^[23],故本文选用Ⅲ类水质标准作为标准值来计算各项污染因子的单因子污染指数以及平均污染指数.

平均污染指数能够在一定程度上反映河流整体水质状况.从图2可知,小清河入海口在2008~2017年间平均污染指数范围为0.64~2.27,大部分监测年月平均污染指数值大于1,整体水质污染程

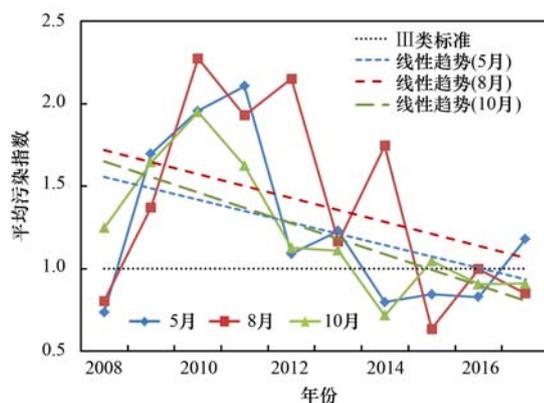


图2 2008~2017年小清河入海口污染物平均污染指数变化

Fig. 2 Changes in the mean pollution index in the Xiaoqing River estuary from 2008 to 2017

度仍然较高.从小清河入海口平均污染指数线性倾向趋势可以看出,平均污染指数随时间的变化呈减小趋势,说明小清河入海口水环境质量呈现好转状态,污染状况大大减轻.

2.2 小清河入海口各项污染因子污染程度及变化趋势

根据污染物指数评价法,当污染因子的指数值大于1时,即表明该项污染因子浓度已超标,污染指数越大,说明该项污染物污染程度越严重.从图3可知,小清河入海口石油类污染物浓度在2009~2011年以及2014年8月属于V类水质标准,其余年月属于IV类水质标准,污染程度严重.化学需氧量是表示水体有机污染的一项重要指标,可以大致反映出水体有机污染物含量,小清河入海口该项污染物污染程度最为严重,绝大部分监测年月为V类水质标准,其中2012年8月有机污染最为严重.氨氮污染指数在2008~2009年发生骤降,2008年的5和8月为V类水质,2008年10月为IV类水质,自2009年起,氨氮含量均符合Ⅲ类水质标准.硝酸盐氮除了在2008年、2016年以及2017年部分月份不符合Ⅲ类水质标准外,其余年月绝大部分符合Ⅲ类水质标准.磷类污染物在8月污染程度较为严重,2008~2017年8月水质均不符合Ⅲ类水质标准,仅在2008年5月、2010年5和10月、2012年5月和2014年10月浓度含量符合Ⅲ类水质标准.亚硝酸盐氮、砷在2008~2017年浓度均符合Ⅲ类水质标准.重金属类污染物平均污染指数低于1,基本符合Ⅲ类水质标准.

从图4可知,镉、铅和六价铬浓度在2017年均有月份超出过Ⅲ类水质标准,由此可以解释2016~2017年重金属类污染物平均污染指数骤升并有超过Ⅲ类水质标准迹象;六价铬污染浓度在2016年8月超过Ⅲ类水质标准,在2017年5月超过V类水质标准;镉在2011年8月超过V类水质标准,污染程度严重.

表1为2008~2017年小清河入海口各项污染因子的污染指数与年份序列的Spearman相关系数,当Spearman相关系数为正值时,说明污染指数序列值随年份序列的增加呈上升趋势,水质趋于恶化,当为负值时,说明呈下降趋势,水质趋于改善,Spearman相关系数绝对值越大,则说明污染指数随年份增加变化程度越大.从表1可知,石油类和化学需氧量污染浓度虽远超过Ⅲ类水质标准,但是两者的Spearman相关系数均为负,说明石油类和化学需氧量的污染程度呈下降趋势;此外,亚硝酸盐氮和砷

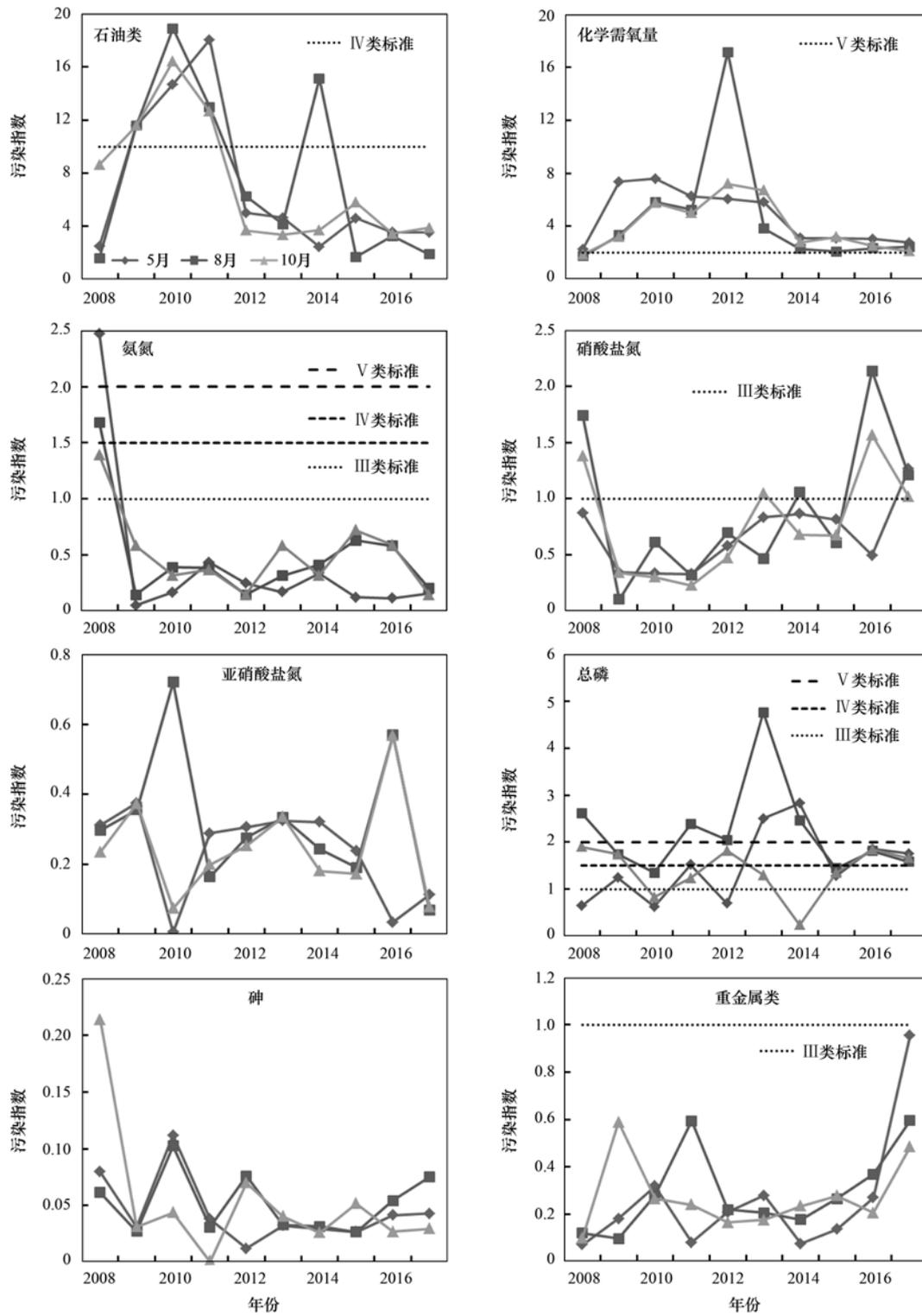


图3 2008~2017年小清河入海口各项污染物指数变化

Fig. 3 Changes in the pollution index of the Xiaoqing River estuary from 2008 to 2017

的 Spearman 相关系数也为负,两者污染程度亦呈下降趋势. 硝酸盐氮以及重金属中的铜、铅和镉的 Spearman 相关系数为正,这几类污染物的污染程度呈上升趋势. 氨氮在 8 月 Spearman 相关系数绝对值很小,可以忽略其变化趋势, 5 和 10 月均为负值,也可说明氨氮污染程度总体呈下降趋势. 磷类污染物在 5 月 Spearman 相关系数为正且绝对值较大,说明

污染程度上升趋势明显,而在 8 和 10 月为负值且绝对值较小,忽略其变化,则磷类污染程度整体略呈上升趋势. 锌在 5 月 Spearman 相关系数绝对值很小,忽略其变化,则锌污染程度整体略呈上升趋势. 汞和六价铬均在 10 月 Spearman 相关系数绝对值很小,在 5 和 8 月为正且绝对值较大,则视两者污染程度整体均为上升态势.

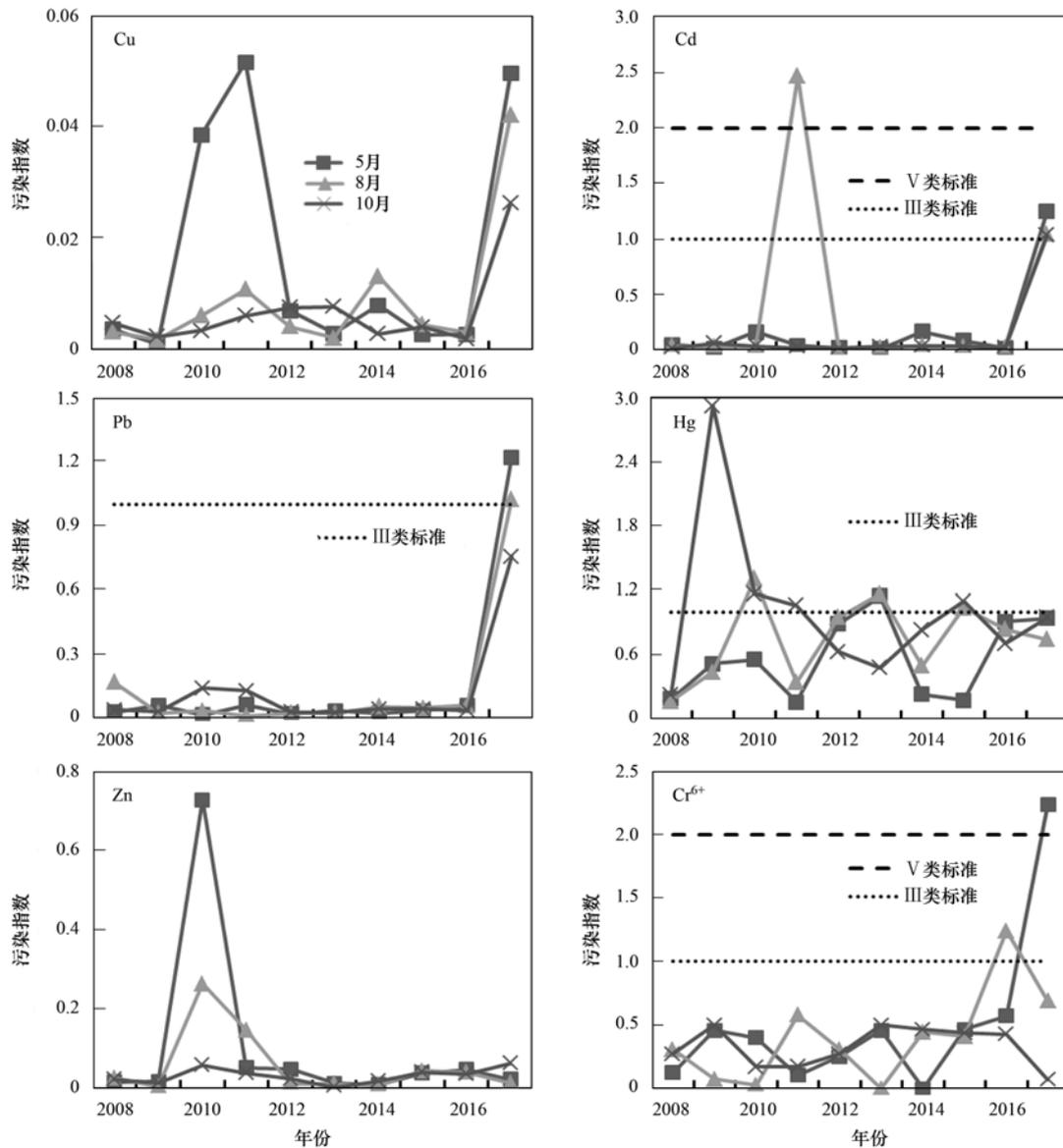


图4 2008~2017年小清河入海口金属类污染物指数变化

Fig. 4 Changes in the metal pollution index in the Xiaoqing River estuary from 2008 to 2017

表1 小清河入海口各项污染物 Spearman 相关系数¹⁾

Table 1 Spearman coefficient of pollutants in the Xiaoqing

项目	River estuary		
	5月	8月	10月
石油类	-0.406	-0.248	-0.588
化学耗氧量	-0.442	-0.188	-0.224
氨氮	-0.37	0.018	-0.212
硝酸盐氮	0.358	0.37	0.394
亚硝酸盐氮	-0.394	-0.394	-0.127
总磷	0.673 *	-0.212	-0.103
砷	-0.200	-0.055	-0.382
铜	0.055	0.382	0.139
铅	0.345	0.394	0.212
锌	-0.067	0.018	0.370
镉	0.200	0.030	0.200
汞	0.406	0.333	-0.055
六价铬	0.578	0.626	-0.067

1) * 表示在 0.05 级别, 相关性显著

3 讨论

3.1 社会经济因素对小清河入海口水质的影响

3.1.1 污染物排放与土地利用类型变化

小清河入海口石油污染严重与其干支流接纳了大量的石油污染物排放有极大的关系, 齐鲁石油化工公司、胜利油田等国家重点石油开采加工产业均分布于该流域。于璐的研究结果表明, 小清河流域各区域工业废水中石油类污染物排放量存在差异性, 但整体来看石油类污染浓度呈现下降趋势, 这与本文中石油类污染物指数呈下降趋势的研究结果相一致^[14]。

从图5可知, 2008~2017年小清河流域所在5个地市化学需氧量、氨氮排放量均呈下降趋势, 尤其是氨氮排放量下降趋势显著, 可以推测污染物排放

量减少是化学需氧量、氨氮污染指数减小的重要原因。但是,小清河流域城市污水排放量、农药使用量等仍维持在较高水平,无明显降低趋势,固体废弃物排放量更是逐年增加,这也是导致小清河入海口磷类污染程度整体上升的重要原因。

表 2 为 2008 ~ 2017 年小清河入海口重金属类污染因子之间的 Pearson 相关系数,表 3 为重金属类污染因子主成分分析结果。从表 2 和 3 可知,铅、镉和六价铬两两之间均存在显著正相关关系,并在主成分分析结果中构成第一主成分,而且在 2017 年这 3 种重金属污染物均存在污染超标情况,说明它们可能来自同一污染源。河流中重金属污染物来源较广,包括重金属制品加工与生产、工业和生活污水排放、固体废弃物排放、农业农药和肥料的施用以及能源燃料燃烧等^[24,25]。从图 5 可知,小清河流域近年来固体废弃物排放量逐年递增趋势明显,这在很大程度上可以解释铅、镉、六价铬(第一主成分)以及铜(第二主成分)等重金属污染程度呈上升趋势。

表 2 小清河入海口重金属污染因子 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation analysis of heavy metal pollution factors in the Xiaoqing River estuary

	铜	铅	锌	镉	汞	六价铬
铜	1					
铅	0.074	1				
锌	-0.369	0.161	1			
镉	0.132	0.771***	0.319	1		
汞	-0.209	-0.076	0.344	-0.141	1	
六价铬	0.402	0.685*	-0.127	0.549	-0.25	1

1) **表示在 0.01 级别,相关性显著,*表示在 0.05 级别,相关性显著

表 3 小清河入海口重金属类污染因子主成分分析结果

Table 3 Principal component analysis of heavy metal pollution factors in the Xiaoqing River estuary

重金属	第一主成分	第二主成分
铜	—	0.834
铅	0.852	—
锌	—	0.691
镉	0.861	—
汞	—	-0.772
六价铬	0.876	—
方差贡献率/%	38.09	30.32
累积方差贡献率/%	38.09	68.41

虽然 2008 ~ 2017 年小清河入海径流水质得到持续改善,但大部分污染物浓度不符合Ⅲ类水质标准,平均污染指数水平较高,小清河流域仍为山东省污染程度最严重的地区之一。从图 5 可知,2008 ~ 2017 年小清河流域所在 5 个地市污水、化学需氧量、氨氮和固体废弃物排放量以及农药施用量占全省总量的比例均超过 25%,说明污染物排放是小清

河总体水质状况较差的重要因素。

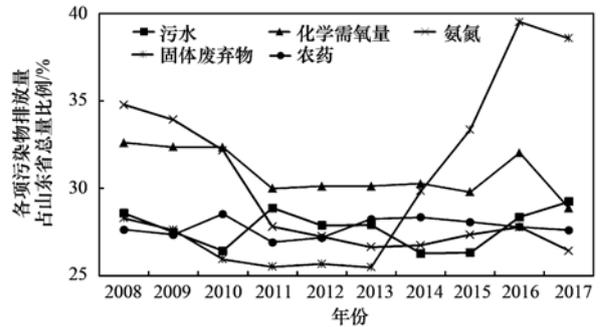


图 5 小清河流域主要污染物排放量占山东省总排放量的比例
Fig. 5 Proportion of sewage discharge in the Xiaoqing River Basin in Shandong province from 2008 to 2017

随着城市化进程的不断加快和经济的发展,农业用地、林地等土地利用类型正逐渐被各种建设用地所代替,这种转变使城市不透水面的范围逐渐扩大,导致地表下渗能力减弱,为城市地表水体携带污染物汇入河川径流提供了方便^[26~28]。工业建设用地作为点源污染影响河流水质,对水质影响比较大,农业用地中残余的化肥、农药和杀虫剂等也会在雨水的冲刷下进入水体,所以,工农业生产活动对水质所产生的直接或间接的影响也是土地利用变化的结果^[29,30]。杨琴等^[31]在研究中发现,淮河在河南河段水体中化学需氧量、氨氮和总磷的浓度与该流域范围内城镇建设面积呈正相关,与林地、草地和荒地的面积呈负相关。小清河流经的 5 个地市在 2002 年农用地面积为 19 156.86 km²,城市建设用地为 535.56 km²; 2008 年,农用地面积达到 31 355.34 km²,增加了 1.6 倍,城市建设用地面积增幅更为显著,达到 8 248.59 km²,增加了 15.4 倍;到 2014 年,农用地面积继续增加至 31 795.74 km²,城市建设用地面积增加至 8 926.88 km²。所以,建设用地和农用地面积的增加使小清河接纳更多的面源、点源污染排放,其中,建设用地面积的持续高速增长更加加重了小清河水环境治理的负担。

3.1.2 污水处理以及水环境保护政策的实施

氮污染在我国地表水中普遍存在。生命体及其排泄物等含氮有机物进入水体后,经矿化作用形成氨氮;氨氮经过硝化作用可形成亚硝酸盐氮,并最终形成硝酸盐氮。根据河流中氨氮、亚硝酸盐氮以及硝酸盐氮的含量变化,可以判断河流水质变化情况^[32]。从图 6 可知,小清河入海口硝酸盐氮浓度较高,氨氮与亚硝酸盐氮浓度比较低,表示小清河曾经氮污染严重,但自 2012 年来自净作用已逐渐完成,硝酸盐氮污染指数的提高说明小清河水体污染状况改善。氮污染主要来源于污水排放(包括工业废水和生活污水等)以及农业生产活动中施用的化学制

品等. 从图 7 可知, 进入 21 世纪以来, 小清河流域污水排放量呈明显增加趋势, 2017 年排放量更是达到了 9.6 亿 t, 是近 20 年来污水排放量最多的年份. 与此同时, 小清河流域污水处理率也呈逐年增加态势, 2013 年之后污水处理率一直维持在 96% 以上, 2017 年更是达到了 98%, 说明 2008 ~ 2017 年氮污染状况改善以及小清河整体水环境质量明显好转与污水处理率的提高密切相关. 在污水排放量日益增加的情况下, 扩建污水处理厂, 加大对其投资力度, 使污水处理率维持在较高水平, 是改善小清河水质的重要途径之一.

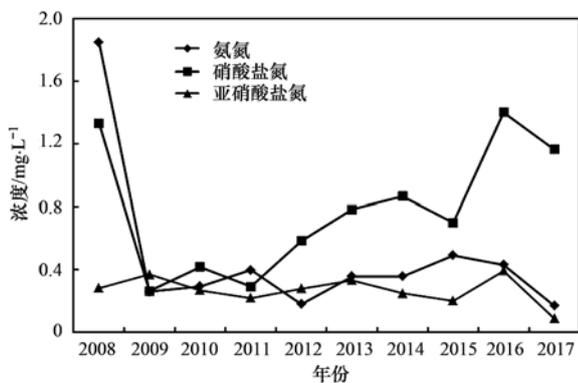


图 6 小清河入海口氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮污染浓度变化

Fig. 6 Changes in the concentrations of NH_4^+-N , NO_3^--N , and NO_2^--N in the Xiaoqing River estuary from 2008 to 2017

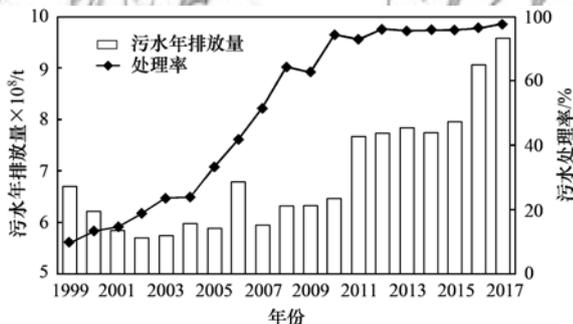


图 7 小清河流域污水排放量以及污水处理率

Fig. 7 Sewage discharge and treatment rate of sewage in the Xiaoqing River Basin from 1999 to 2017

进入 21 世纪以来, 山东省各级政府以及社会采取了一系列政策、措施来改善小清河的水环境质量. 虽然小清河水质整体上仍然处于比较高的污染水平, 但近年来, 通过严格规定小清河流域污水排放标准, 加大污染物处理相关基础设施的资金投入, 降低污染物入河量等综合治理, 小清河流域水质以及水生生态系统得到了一定程度的改善, 水环境保护政策的实施取得良好成效^[16,33].

3.2 自然因素对小清河入海口水质的影响

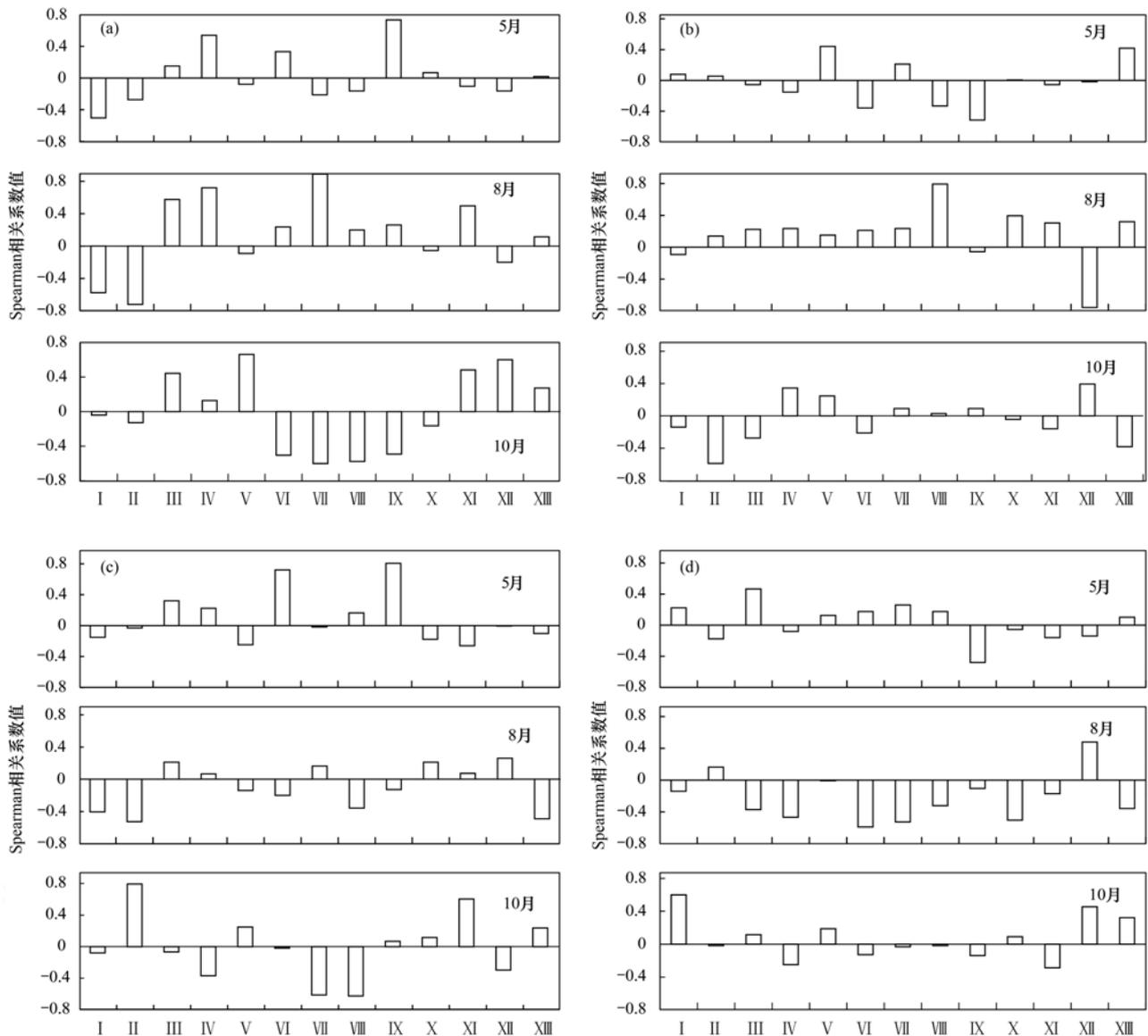
气候、水文要素的变化对于河流水质的影响并不像流域内废水排放等对河流水质产生直接影响,

而是经过长时间的积累, 通过影响流域水文过程和生物地球化学过程, 对水质产生间接的影响^[34~36]. 由于不同流域自然因素差别很大, 所以针对自然因素对水质的影响方式和程度, 不同学者研究结果存在差别. 本研究选取小清河流域月平均温度、月降水量和月累计日照时长以及入海瞬时径流这 4 个影响指标, 与对应时段的各项污染指数进行 Spearman 相关性分析, 来研究气候和水文等自然因素对小清河入海口水质的影响程度, 结果如图 8 所示.

温度变化从多方面影响河流水质的变化, 地表气温在很大程度上与邻近水域的水温相一致, 因此地表气温的变化将影响水温的变化^[37]. 水温的变化会改变水体中各种微生物的活性, 影响其生产速率, 进而影响水体中各种有机污染物质的浓度和污染物被降解程度的变化. 从图 8(a) 可知, 小清河入海口石油类、化学需氧量污染指数与温度呈负相关关系, 且温度越高, 相关性越强, 说明随着温度的升高, 降解石油类、有机物污染物的微生物活性越强; 氨氮、硝酸盐氮等氮类污染指数与温度呈正相关关系, 且温度越高, 相关性越强. 氮类污染物与温度呈正相关的原因主要有两点, 一是氮元素在水体内的迁移、转化和循环很大程度上依赖于微生物参与的矿化作用和硝化作用等, 而与碳元素转化有关的微生物的活性深受温度影响, 二是有机氮向氨氮转化的矿化作用过程会随着温度的升高而加快^[38].

降水量增加既可以稀释河流中污染物浓度, 又可以加大对面源污染区的冲刷力度从而使更多污染物汇集到河流, 所以不同地区河流水质对降水的响应不同^[39,40]. 康健^[37]的研究表明, 降水量的增加使乌梁素海流域水体污染变得更加严重, 而郭婧等^[41]的研究表明, 降水对北运河系水质起到了良好的改善作用. 从图 8(b) 可知, 在降水量最高的 8 月, 除磷污染程度随降水的增加呈显著降低趋势外, 小清河入海口绝大部分污染物的污染指数与降水呈正相关关系, 说明在降水量较大的时候, 水质随降水的增加而变差, 这主要由于降雨越多, 对小清河流域面源污染的冲刷越严重, 汇集到干支流中的污染物也越多.

有研究表明, 日照时长主要通过影响水体中藻类等水生植物的光合作用, 来影响水体中某些污染物的浓度变化^[34]. 从图 8(c) 可知, 不同日照时长水平下, 日照时长与小清河入海口各项污染指数相关程度有很大不同, 5 月平均日照时长最长, 与镉污染指数呈极强正相关关系, 与铜呈强正相关关系; 10 月日照时长次之, 与化学需氧量污染指数呈极强正相关关系, 与六价铬呈强正相关关系, 与铅、锌等



(a) 温度; (b) 降水量; (c) 月累计日照时长; (d) 瞬时径流; I 为石油类污染物, II 为化学耗氧量, III 为氨氮, IV 为硝酸盐氮, V 为亚硝酸盐氮, VI 为铜, VII 为铅, VIII 为锌, IX 为镉, X 为汞, XI 为六价铬, XII 为总磷, XIII 为砷

图 8 小清河入海口 2008 ~ 2017 年的 5、8 和 10 月的各项污染指数与温度、降水量、月累计日照时长以及瞬时径流相关关系

Fig. 8 Spearman correlativity of the pollution indices and temperature, sunshine duration, precipitation, and streamflow in May, August, and October from 2008 to 2017

呈强负相关关系。

径流对水质的影响与降水是密不可分的,但是,小清河流域作为山东省重要经济腹地,人口稠密,工农业发展历史悠久,大量工业、生活废水汇集到小清河,加之黄河水源对小清河径流的补给等影响,近年来小清河径流量与降水量的相关程度逐渐降低^[42]。一般情况下,径流流量越大,流速越快,水体中的污染物越容易被稀释扩散。温度的变化通常也会通过蒸发、土壤湿度、冰川融雪等驱动因素影响径流,进而影响水质^[30]。从图 8(d)可知,8 月小清河入海口瞬时径流要略高于 5 月、10 月,与磷污染指数呈中度正相关关系,与硝酸盐氮、铜、铅和汞呈中度负相关关系,8 月瞬时径流与各类污染指数的相关

程度也要比 5 月和 10 月高一些。除氨氮、磷类污染物外,其他污染物指数均与 8 月瞬时径流呈负相关关系,即随瞬时径流量的增加水质趋于变好,这主要是由于径流在增加的时候会稀释污染物浓度。

4 结论

(1) 小清河入海口水环境质量整体呈好转状态,污染状况大大减轻,但不同污染物的污染程度变化趋势存在很大差异。石油类、化学需氧量、亚硝酸盐氮和砷等污染物的污染程度均呈下降趋势;硝酸盐氮以及重金属中的铜、铅和镉等污染物的污染程度均呈上升趋势。其余污染物在不同月份污染程度变化趋势不同,整体来看,氨氮污染程度呈下降趋

势,磷、锌、汞和六价铬等污染物的污染程度略呈上升趋势。

(2)社会经济因素是影响小清河水质状况的主要驱动因素,其中污染物排放以及土地利用类型变化是小清河水环境质量整体较差的主要原因,而污水处理率的提高以及水环境保护政策的实施使小清河水环境质量明显改善;自然因素是影响小清河水质状况的次要驱动因素,温度、日照时长、降水和瞬时径流等气候与水文因素间接影响小清河入海径流的水质。

参考文献:

- [1] 王乐扬,李清洲,杜付然,等. 20年来中国河流水质变化特征及原因[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 84-88.
Wang L Y, Li Q Z, Du F R, *et al.* Characteristics and causes of water quality change in Chinese Rivers during the recent 20 years [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(3): 84-88.
- [2] 孙玉娟,田建立,韩丽君,等. 2011—2016年河北省主要入海河流水质及污染状况分析[J]. 河北工业科技, 2018, 35(5): 348-353.
Sun Y J, Tian J L, Han L J, *et al.* Analysis of water quality and contaminative condition of main estuaries in Hebei Province in 2011—2016 [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2018, 35(5): 348-353.
- [3] 石敏. “十二五”期间辽宁省主要入海河流水质变化与入海通量分析[J]. 环境研究与监测, 2018, 31(1): 46-48.
Shi M. Analysis on the variations of the water quality and pollutant fluxes from the rivers flowing into the sea of Liaoning Province [J]. Environmental Research and Monitoring, 2018, 31(5): 348-353.
- [4] 师吉华,李秀启,董冠仓,等. 黄河山东段水环境质量分析与评价[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 229-235.
- [5] 国峰,李志恩,时俊,等. 长江入海口徐六泾断面 2005~2012年水环境因子及入海通量变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 227-232.
- [6] 孙伟,张守本,杨建森,等. 小清河口水环境质量评价及主要污染物入海通量研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(3): 366-371.
Sun W, Zhang S B, Yang J S, *et al.* Quality assessment of aquatic environment and fluxes of major pollutants to the Xiaoqing River estuary [J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(3): 366-371.
- [7] 孙好芬,王安琪,郭玉超,等. 小清河中下游水质初步调查[J]. 山东化工, 2018, 47(22): 175-177.
Sun H F, Wang A Q, Guo Y C, *et al.* Preliminary investigation of water quality in the middle and lower reaches of Xiaoqing River [J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(22): 175-177.
- [8] 姜德娟,王琼,李瑞泽,等. 基于 SWAT 模型的小清河流域总氮输出模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 1-7.
Jiang D J, Wang Q, Li R Z, *et al.* Simulation of total nitrogen transport based on SWAT model in Xiaoqinghe River Basin of Shandong Province [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(6): 1-7.
- [9] 张荣荣,黄振,刘雅文,等. 小清河中下游水体中硝态氮含量调查[J]. 山东化工, 2019, 48(4): 213-214.
Zhang R R, Huang Z, Liu Y W, *et al.* Investigation of nitrate content in waters of the middle and lower reaches of Xiaoqing River [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(4): 213-214.
- [10] 徐晓晨,苏莹,李克强,等. 基于费效优化模型的小清河流域入海总氮污染物治理措施初步研究[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(4): 97-105.
- [11] 杨红军,张衍亮,房吉敦,等. 小清河入海口底泥重金属空间分布特征与风险评价[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 486-492.
- [12] 龙浩然. 流域水质变化驱动力研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(4): 91-93, 109.
Long H R. Research progress of driving forces of water quality in watershed [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(4): 91-93, 109.
- [13] 张雪. 近三十年莱州湾主要污染物时空变化及小清河口水质评价指标体系建立[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
Zhang X. Spatio-temporal variability of principal pollutants in Laizhou Bay in nearly 30 years and establishment of evaluation index system in water of Xiaoqing River estuary [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [14] 于璐. 小清河流域工业废水石油类污染减排潜力研究[D]. 济南:济南大学, 2014.
Yu L. Research on potential of industrial wastewater petroleum pollution emission reduction in Xiaoqing River Basin [D]. Ji'nan: University of Ji'nan, 2014.
- [15] 王琼. 基于 SWAT 模型的小清河流域氮磷污染负荷核算及总量控制[D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所, 2015.
Wang Q. Calculation of the discharge amounts and total pollution amount control of nitrogen and phosphorus in Xiaoqinghe watershed [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [16] 刘文杰. 小清河流域水环境保护政策回顾性评价[D]. 济南:山东大学, 2017.
Liu W J. Retrospective evaluation of water environmental protection policy in Xiaoqing River Basin [D]. Ji'nan: Shandong University, 2017.
- [17] 潘幸,黄晓荣,魏晓玥,等. 三种常用水质评价方法的对比分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2019, (6): 51-55.
Pan L, Huang X R, Wei X Y, *et al.* A comparative analysis of three common water quality evaluation methods [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019, (6): 51-55.
- [18] 佟玲玲. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 黑龙江科技信息, 2016, (15): 113.
- [19] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. (第二版). 北京:气象出版社, 2007. 18-19.
- [21] 徐建华. 计量地理学[M]. (第二版). 北京:高等教育出版社, 2014. 94-95.
- [22] 赵自阳,李王成,王霞,等. 基于主成分分析和因子分析的宁夏水资源承载力研究[J]. 水文, 2017, 37(2): 64-72.
- [23] 山东省环保厅. 山东省地表水环境功能区划(第二次征求意见稿)[M]. 济南:山东省环保厅, 2010.
- [24] 廖启林,任静华,姜丽,等. 江苏典型地区河流沉积物重金属元素分布特征及其污染来源[J]. 地质学刊, 2018, 42(4): 651-661.
- [25] 王洪涛,张俊华,丁少峰,等. 开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4520-4530.

- Wang H T, Zhang J H, Ding S F, *et al.* Distribution characteristics, sources identification and risk assessment of heavy metals in surface sediments of urban rivers in Kaifeng[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4520-4530.
- [26] 季香, 刘红玉, 李玉凤, 等. 不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2101-2112.
- Ji X, Liu H Y, Li Y F, *et al.* Spatial response of river water quality to watershed land use type and pattern under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2101-2112.
- [27] Giri S, Qiu Z Y. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **173**: 41-48.
- [28] Yu D Y, Shi P J, Liu Y P, *et al.* Detecting land use-water quality relationships from the viewpoint of ecological restoration in an urban area[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **53**: 205-216.
- [29] 崔丹, 陈岩, 马冰然, 等. 土地利用/景观格局对水环境质量的影晌[J]. *水科学进展*, 2019, **30**(3): 423-433.
- [30] 庞博, 王铁宇, 吕永龙, 等. 洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 379-384.
- Pang B, Wang T Y, Lü Y L, *et al.* Temporal variation of water quality and driving factors in Yanghe watershed of Zhangjiakou [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 379-384.
- [31] 杨琴, 汤秋鸿, 张永勇. 淮河流域(河南段)水质时空变化特征及其与土地利用类型的相关性分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(9): 1519-1530.
- Yang Q, Tang Q H, Zhang Y Y. Spatiotemporal changes of water quality in Huai River basin (Henan Section) and its correlation with land use patterns[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9): 1519-1530.
- [32] 刘刚. 生活饮用水中的氨氮污染问题探讨[J]. *中国高新技术企业*, 2011, (27): 146-148.
- [33] 杨永峰, 袁军, 张晓云. 我国流域湿地治理与规划研究——以济南小清河流域为例[J]. *林业资源管理*, 2015, (4): 18-23.
- Yang Y F, Yuan J, Zhang X Y. Research on management and planning of watershed wetland in China—take the Xiaoqing River watershed wetland of Jinan City as an exemple [J]. *Forest Resources Management*, 2015, (4): 18-23.
- [34] 吕睿喆. 河套地区地表水质对气候变化的响应分析[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- Lv R Z. Analysis of surface water quality in response to climate change in Hetao area [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [35] Paul M J, Coffey R, Stamp J, *et al.* A review of water quality responses to air temperature and precipitation changes 1: flow, water temperature, saltwater intrusion [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2019, **55**(4): 824-843.
- [36] Coffey R, Paul M J, Stamp J, *et al.* A review of water quality responses to air temperature and precipitation changes 2: nutrients, algal blooms, sediment, pathogens [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2019, **55**(4): 844-868.
- [37] 康健. 乌梁素海流域近 50 年来气候变化特征分析及其对水文水质的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.
- Kang J. Climate change characteristics and its influence on hydrology and water quality in Wuliangsu Hai Basin in recent 50 years[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2016.
- [38] 叶羽婷. 温度对太湖叶绿素 a 及主要水质指标的影响[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- Ye Y T. Influence of temperature on chlorophyll-a and main water quality indicators in Taihu Lake [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [39] 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 等. 降雨强度对洱河流域凤羽河氮磷排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- Li X H, Lei Q L, Zhou J G, *et al.* Effect of rainfall intensity on the content of nitrogen and phosphorus components in plateau areas: a case study of the Fengyu River watershed [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- [40] 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- Cao R X, Liu J, Deng K K, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- [41] 郭婧, 荆红卫, 李金香, 等. 北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1511-1518.
- Guo J, Jing H W, Li J X, *et al.* Surface water quality of Beiyun Rivers basin and the analysis of acting factors for the recent ten years[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1511-1518.
- [42] 朱琳, 韩美. 降水与人类活动对小清河上游径流量的影响[J]. *绿色科技*, 2016, (18): 147-152.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)